

УДК 624.21.093: 621.21.04

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ МОСТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

О.В. Крутиков

Жесткость балок пролетного строения является одним из факторов, определяющих исправное состояние моста. Жесткость балок обычно подтверждается измерением прогибов под действием временных подвижных нагрузок при статических испытаниях. Как правило, используются геодезические приборы (нивелиры или теодолиты), прогибомеры с проволоочной связью и др. В данной статье рассматривается возможность определения «статических» прогибов по результатам измерения деформаций балок.

AN EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE BRIDGE SUPERSTRUCTURE VERTICAL DISPLACEMENTS BY DEFORMATIONS MEASUREMENT AND LIVE LOAD ANALYSIS

O.V. Krutikov

The vertical stiffness of superstructure is one the most important factors to determine a proper condition of a bridge. Current usual methods suppose direct measurement of vertical displacements by means of geodetic equipment or level meters with wire connection. The experimental technology of vertical displacements evaluation based on superstructure deformations measured with a network of sensors is discussed.

Определение прогибов пролетного строения моста, наблюдающихся по мере движения подвижной нагрузки, предлагается производить исходя из деформаций конструкции. Для измерения деформации в заданных местах пролетного строения устанавливается определенное количество датчиков. При этом подвижная нагрузка оценивается с использованием промежуточных вертикальных нагрузок, приложенных к ездовому поясу конструкции.

Предлагаемый в данной статье алгоритм учитывает воздействие на конструкцию подвижной нагрузки, а не прилагаемой в фиксированных местах, в отличие от [1].

Рассмотренный авторами работы [2] алгоритм расчета прогибов при определении кривизны изгиба балки пролетного строения на участках с помощью датчиков и дальнейшем интегрировании не дает возможности оценить интенсивность воздействующей нагрузки. Область его применения ограничена балочными мостами.

Промежуточная вертикальная нагрузка задается как система сосредоточенных и/или распределенных сил (рис. 1,а) и рассматривается как единичная. Ездовой пояс пролетного строения моста разбивается на n участков, которые определяют места установки единичной нагрузки (рис. 1,б). Текущее деформированное состояние под действием произвольной подвижной нагрузки рассматривается как линейная суперпозиция n загружений указанными нагрузками интенсивностью $X_1, \dots, X_j, \dots, X_n$ ($1 \leq j \leq n$).

Так, деформации в точке k представляется линейным уравнением

$$\epsilon_k = a_{1k}X_1 + \dots + a_{jk}X_j + \dots + a_{nk}X_n \quad (1)$$

Коэффициенты a_{jk} линейного уравнения для точки k и уравнений в других точках могут быть получены расчетами. Деформации пролетного строения ϵ_k в точке k и в других точках определяются измерениями с помощью датчиков. В такой постановке интенсивности нагрузок X_j в уравнении (1) являются неизвестными. Уравнения, определяющие зависимость деформаций балки в m точках, образуют систему из m уравнений, с n неизвестными.

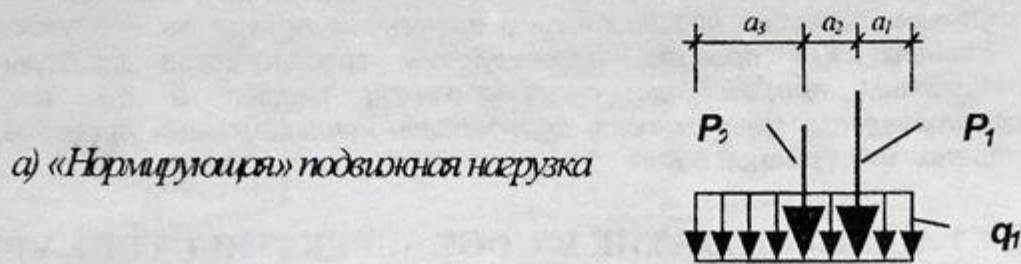
$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \dots \\ \epsilon_k \\ \dots \\ \epsilon_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{j1} & \dots & a_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1k} & \dots & a_{jk} & \dots & a_{nk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1m} & \dots & a_{jm} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_j \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix},$$

или по другому

$$\varepsilon = A_\varepsilon X, \tag{2}$$

здесь

- ε – вектор деформаций,
- A_ε – матрица влияния деформаций,
- X – вектор интенсивностей нагрузок (вектор неизвестных).



б) Единичные загрузкиения

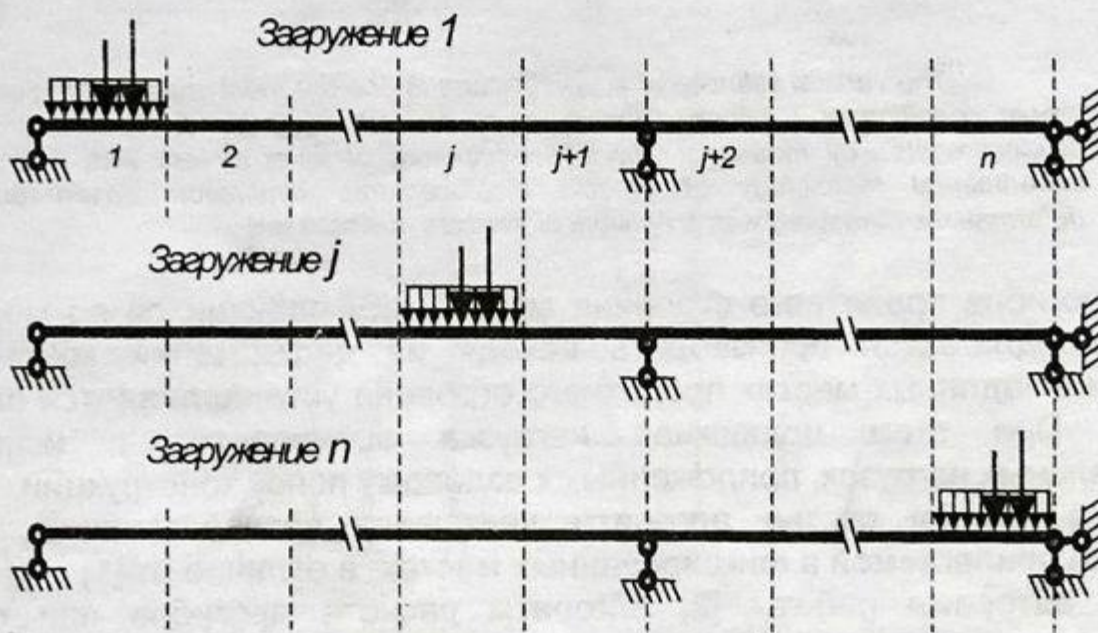


Рис. 1. Схема единичных загрузений

После того как связь между деформациями и неизвестными интенсивностями нагрузок определена в виде системы линейных уравнений, решение обратной задачи при $m = n$ может быть получено методом наименьших квадратов.

$$X = (A_\varepsilon A_\varepsilon^T)^{-1} A_\varepsilon^T \cdot \varepsilon = B \cdot \varepsilon \tag{3}$$

Вычисленные неизвестные - внешние нагрузки - могут быть использованы при определении внутренних усилий, перемещений, опорных реакций и других факторов напряженно деформированного состояния конструкции.

Рассмотрим вычисление прогиба балки в определенной точке, для чего составим уравнение:

$$v = v_1 X_1 + \dots + v_j X_j + \dots + v_n X_n,$$

или в матричном виде

$$v = V_X X,$$

где $V_X = [v_1 \dots v_j \dots v_n]$ - вектор строка, связывающий перемещение точки конструкции с нагрузкой, выраженной в виде промежуточных нагрузок.

С учетом (3)

$$v = V_X \cdot B \cdot \varepsilon = V_\varepsilon \cdot \varepsilon, \tag{4}$$

где V_ε - вектор строка, связывающий перемещение точки конструкции и деформации, фиксируемые датчиками.

Таким образом, при установлении зависимости между нагрузками и деформациями пролетного строения, нагрузками и прогибами, аппроксимация прогиба пролетного строения исходя из деформации в отдельных его точках, фиксируемых датчиками, возможна.

Так как, решая уравнения (2), мы оцениваем или «нормируем» любую временную подвижную нагрузку, воздействующую в данный момент на конструкцию, в виде некоей единичной промежуточной нагрузки (рис. 1, а), назовем промежуточную нагрузку «нормирующей».

В качестве численного примера рассмотрим деформации однопролетной разрезной балки длиной L . Изгибная жесткость балки — EI — постоянная по длине (рис. 2, а).

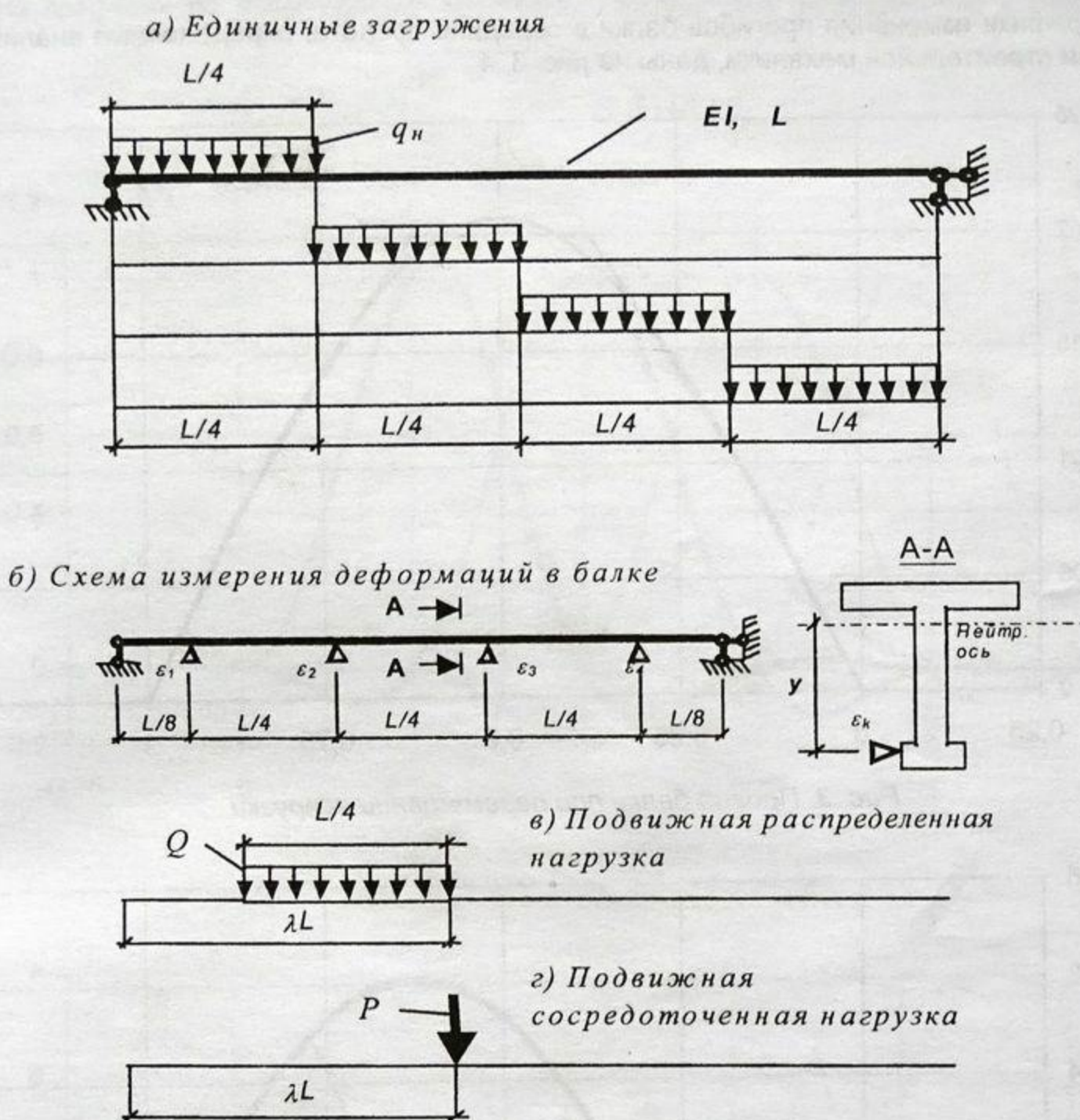


Рис. 2. Схема примера

В качестве временных подвижных нагрузок рассмотрим следующие:

1. Одиночная сосредоточенная сила P (рис. 2, г).
2. Равномерно распределенная нагрузка с интенсивностью Q и длиной $1/4L$ (рис. 2, в);

Положение нагрузок на балке задается безразмерной координатой λ (рис. 2, в, 2, г). Пусть деформации, определяются в четырех сечениях ($m=4$), расположенных по длине балки с шагом $1/4L$ (рис. 2, б). Датчики фиксируют деформации балки при изгибе

$$\epsilon_k = \frac{M_k}{EI} y, \dots (1 \leq k \leq 4),$$

где y — расстояния от места измерения деформаций до нейтральной оси сечения, принятые в данном примере одинаковыми для каждого сечения.

В качестве нормирующей нагрузки примем равномерно распределенную нагрузку с интенсивностью q_n и длиной $1/4L$. Четыре единичных загрузения ($n=4$) представляют собой

установку нормирующей нагрузки в первую, вторую, третью и четвертую четверти по длине балки (рис. 2, а).

Аппроксимированные прогибы от сосредоточенной силы, определенные по формуле (4), в зависимости от λ показаны на рис. 3, 4. Деформации, которые являются известными в (4) и должны быть получены от датчиков, в данном численном примере были определены расчетом балки. Для удобства прогибы приведены к безразмерным величинам

$$w_P = v(P) \frac{EI}{PL^3} \quad \text{и} \quad w_Q = v(Q) \frac{EI}{QL^4}.$$

Графики изменения прогибов балки в середине пролета, определенные аналитически по формулам строительной механики, даны на рис. 3, 4.

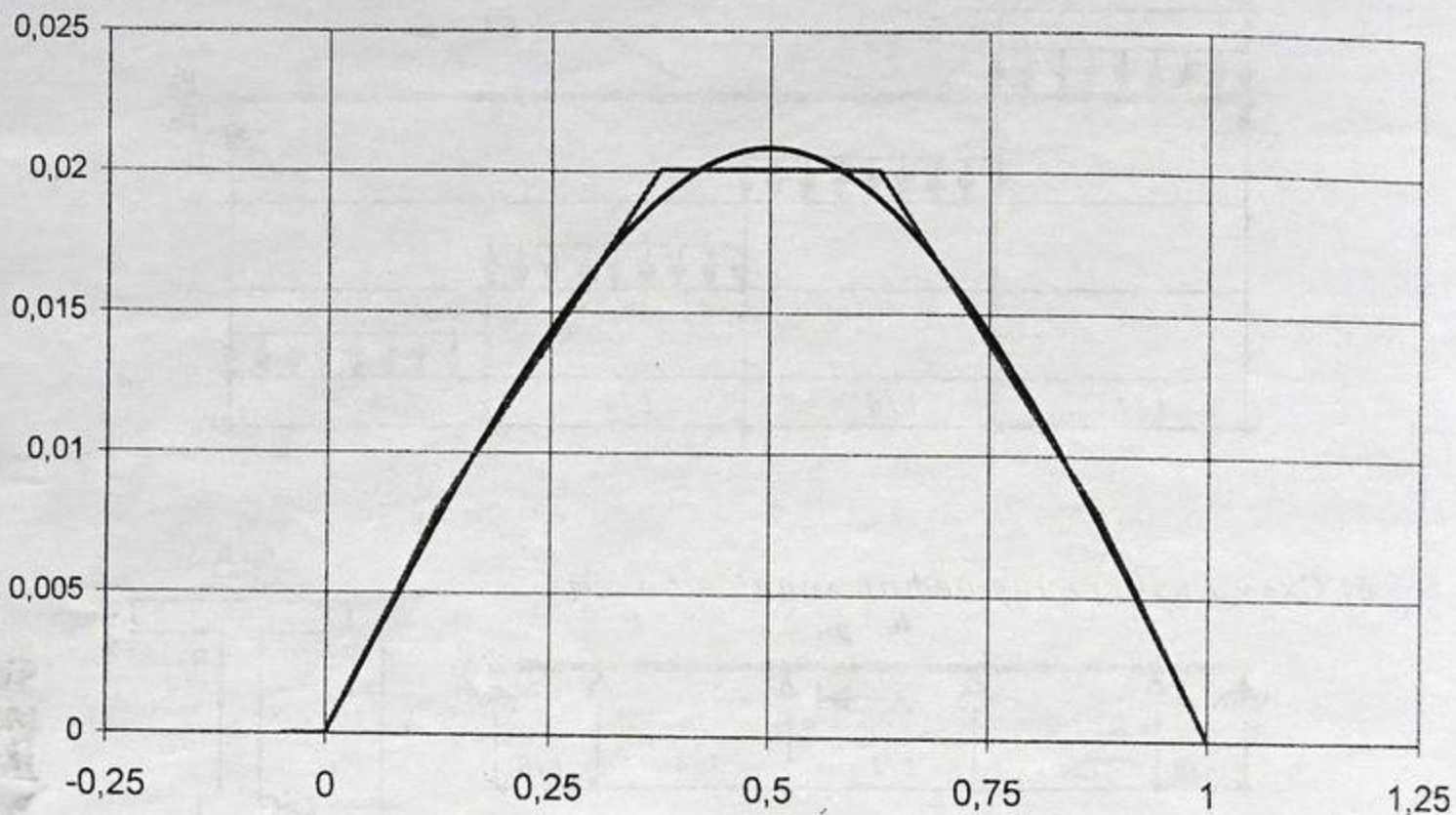


Рис. 3. Прогиб балки при перемещении нагрузки

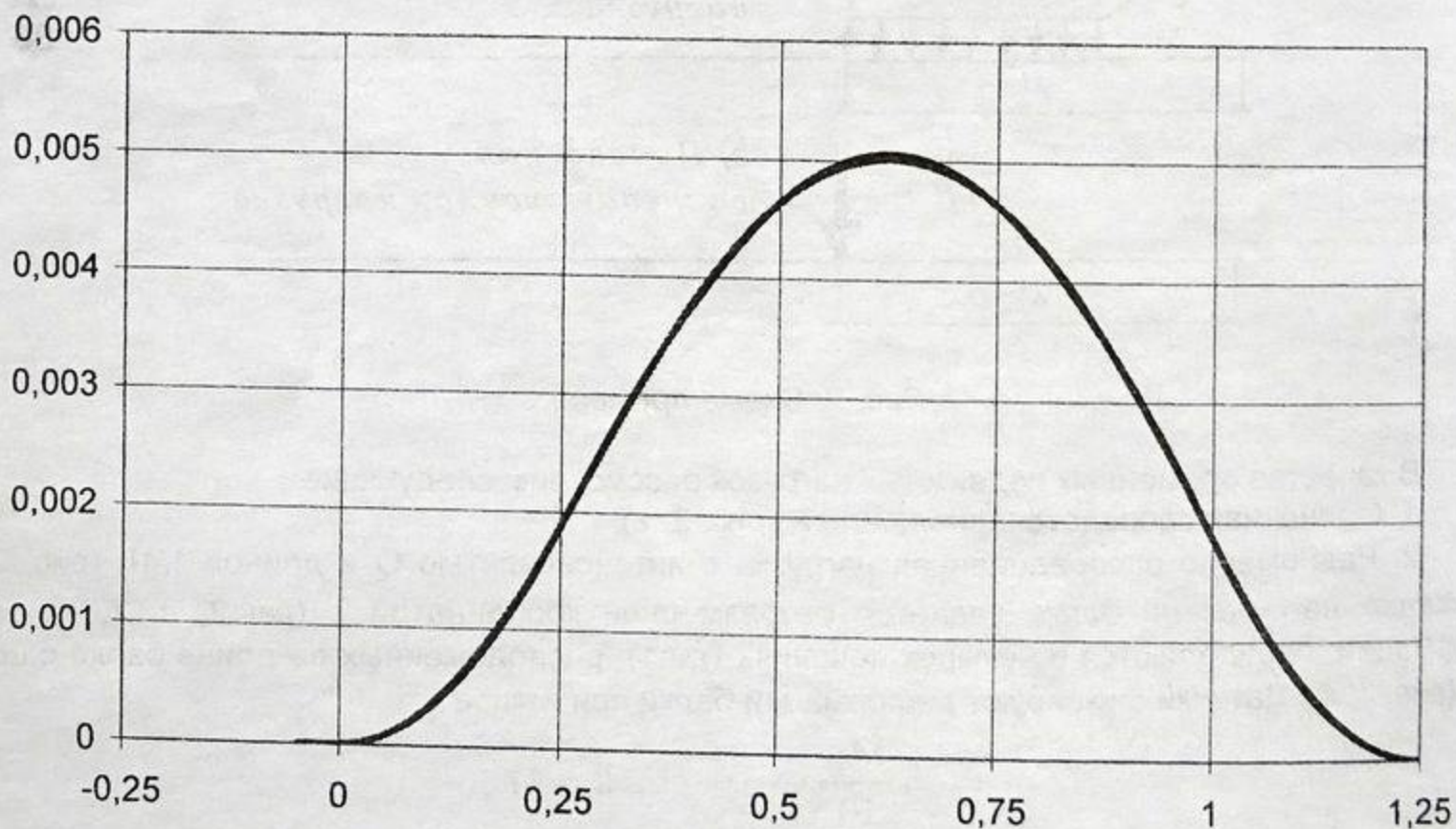


Рис. 4. Прогиб балки при перемещении распределенной нагрузки

Точность совпадения прогибов, которые имеет балка при проходе сосредоточенной силы, рассчитанных по законам строительной механики и аппроксимированных, достаточно высокая. Максимальная разность составляет 4,9% от максимального прогиба.

Для распределенной нагрузки наблюдается еще более высокое совпадение результатов: наибольшая разность не превышает 0,8%, а на графике кривые сливаются.

Предложенный алгоритм аппроксимации предполагает определение прогибов при промежуточной оценке неизвестных X_1, X_2, X_3, X_4 . Рассмотрим, как изменяются неизвестные в зависимости от положения нагрузок по длине балки (рис. 5, 6).

На графиках по осям ординат отложены неизвестные, приведенные к безразмерному виду.

$$x_{Q,i} = X_i(Q) \cdot \frac{q}{Q} \quad x_{P,i} = X_i(P) \cdot \frac{ql}{P}$$

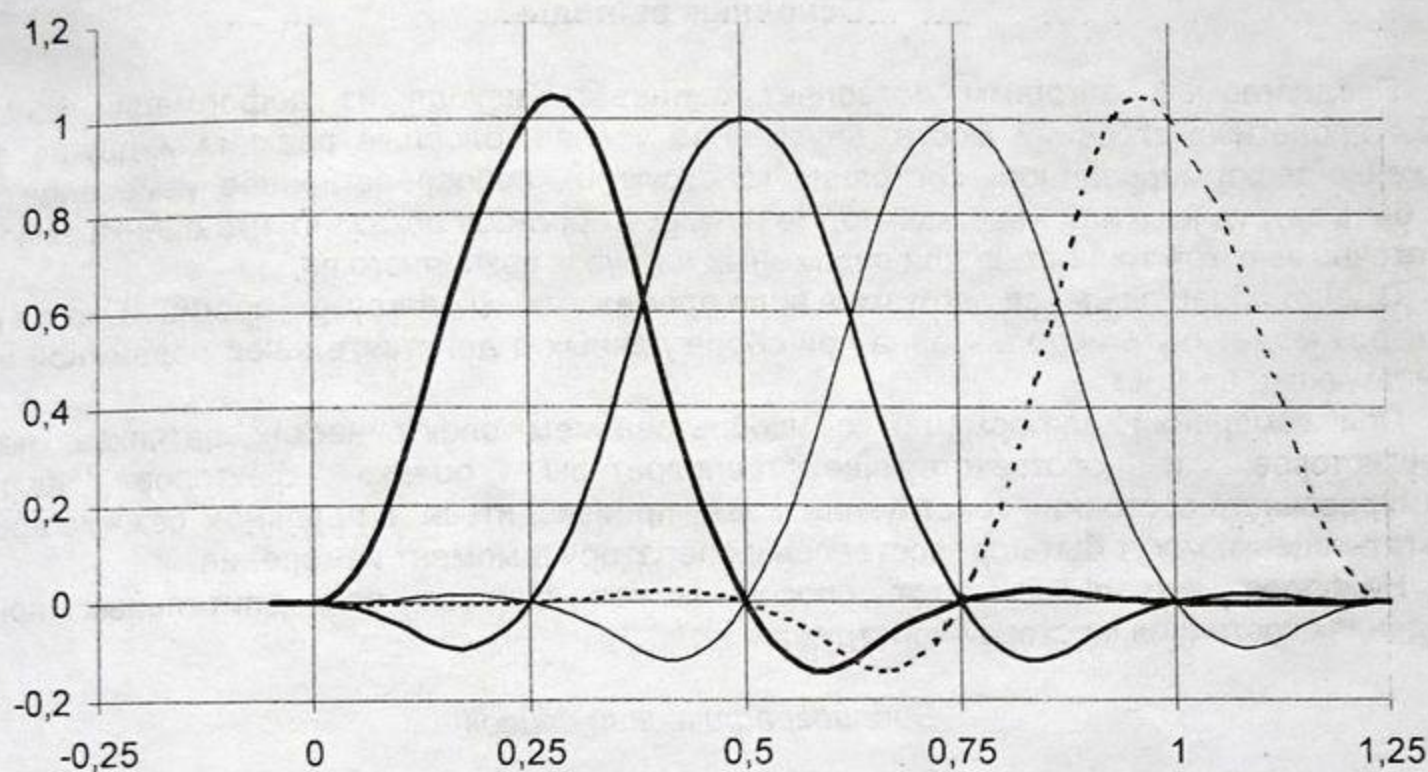


Рис. 5. Изменение промежуточных неизвестных при перемещении распределенной нагрузки

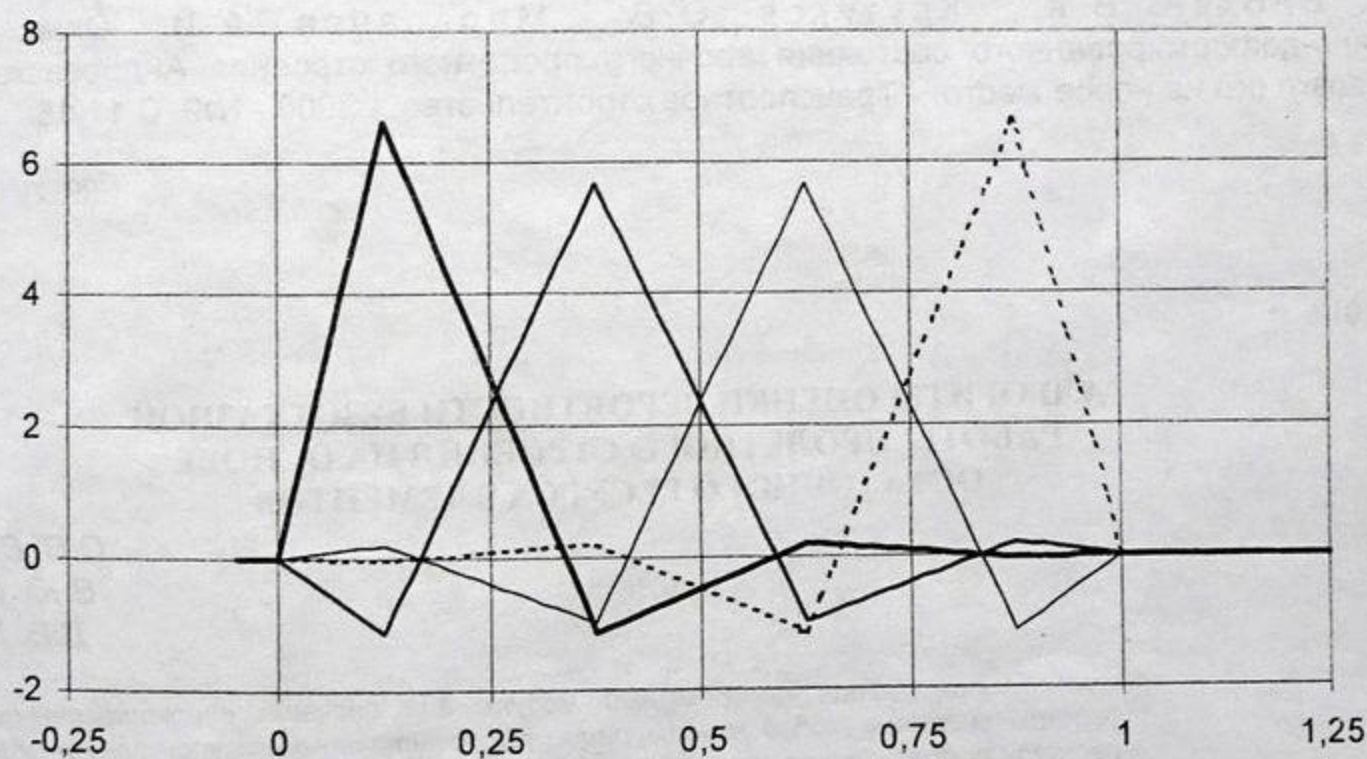


Рис. 6. Изменение промежуточных неизвестных при перемещении сосредоточенной нагрузки

Следует отметить, что любому положению рассматриваемых нагрузок соответствует своя комбинация значений неизвестных.

Так, для распределенной нагрузки Q по мере прохождения ее через места приложения единичных нагрузок формулы дают точные решения ($x_{Q,1} = Q/q$; $x_{Q,2} = 0$; $x_{Q,3} = 0$; $x_{Q,4} = 0$); ($x_{Q,1} = 0$; $x_{Q,2} = Q/q$; $x_{Q,3} = 0$; $x_{Q,4} = 0$) и т.д. Максимальное значение неизвестного наблюдаются при λ , соответствующей совпадению равнодействующих подвижной нагрузки и этого неизвестного, или вблизи этой λ . После выхода нагрузки из зоны рассматриваемого неизвестного, его значения изменяются в пределах от -15% до $+2,5\%$ от упомянутых точных значений.

Значения неизвестных, соответствующих нагрузке в виде сосредоточенной силы, подчиняются похожим закономерностям. Таким образом, анализируя значения неизвестных, можно оценивать проходящие по мосту нагрузки, оценивать их весовые характеристики и положение на ездовом поясе.

Основные выводы

Предлагаемый алгоритм позволяет оценивать исходя из деформаций конструкции прогибы пролетных строений моста, внутренние усилия, опорные реакции и другие факторы напряженно-деформированного состояния конструкции, непосредственное измерение которых может быть затруднено или невозможно. На примере прогибов показано, что оценка выполняется с достаточно высокой точностью для подвижных нагрузок различного вида.

Оценка обращаемой нагрузки в виде промежуточных нагрузок, прогибов моста и других параметров может быть использована при сборе данных о действительной подвижной нагрузке, воздействующей на мост.

При измерении деформаций с использованием электрических датчиков, например, тензорезисторов, и соответствующей аппаратуры, оценка факторов напряженно-деформированного состояния конструкции может производиться в реальном режиме времени, а результаты оценки могут быть предоставлены оператору в момент измерения.

Наиболее актуальным этот способ может явиться при длительных приборных наблюдениях состояния мостовой конструкции.

Библиографический список

1. Vurpillot S., Inaudi D., Scanno A. Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurement of a bridge, Proc. SPIE Vol. 2719, SPIE Int. Conf. «Smart Structures and Materials 1996: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways», San Diego, 1996, P. 46-53.

2. Блохин В.К., Крутиков О.В., Марасанов А.И. Опыт контроля напряженно-деформированного состояния арочного пролетного строения Андреевского моста при перевозке его на новое место. - Транспортное строительство. - 2000. - №9. С.11-15.

Поступила 02.10.03.

УДК 624.21.01:5

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ

О.В. Смирнова
В.Ю. Смирнов
Д.В. Шохирев

Разработан программный модуль для расчета вероятности безотказной работы системы любой конфигурации по остаточному ресурсу элементов. В основу расчета положен алгоритм, позволяющий исследовать влияние топологии соединения и характеристик надежности элементов на надежность всей системы. Решается задача оценки надежности пролетных строений моста на основе статистических данных по надежности для отдельных элементов.